5Н

УДК 004.89:004.031.43

Ю.И. Нечаев, О.Н. Петров
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
petr_oleg@mail.ru

Исследование поведения нестационарного динамического объекта в бортовых ИС новых поколений*

Рассмотрен подход, основанный на реализации принципа конкуренции в рамках концепции мягких вычислений. Методологической основой для построения алгоритмических процедур принятия решений в нечетких условиях является концепция оптимальности решения и имеющихся ресурсов (нечеткая цель и ограничения).

Введение

Нестационарные системы – достаточно распространенный класс динамических систем. Изучение поведения таких систем представляет большой научный и практический интерес при контроле динамики сложных объектов. В настоящей работе развивается подход к синтезу нейросетевых моделей систем, характеристики которых изменяются с течением времени. Оценка параметров и определение структуры модели осуществляются на основе разработанного алгоритма структурного и параметрического синтеза нейронной сети.

Эффективность процедур обработки информации и принятия решений в значительной степени определяется качеством моделей, используемых как для описания объектов и закономерностей, так и для прогнозирования будущего состояния систем. Во многих прикладных задачах возникает необходимость в обработке нестационарных последовательностей и формировании модели систем, характеристики которых изменяются с течением времени. Одной из таких задач, связанных с использованием нейросетевых технологий, является контроль характеристик морского динамического объекта (ДО) в условиях непрерывного изменения параметров объекта и внешней среды [1-26].

Типичные картины возникновения и развитие нестационарных процессов можно наблюдать при изучении процессов взаимодействия аварийного ДО с внешней средой при контроле непотопляемости судна в бортовой интеллектуальной системе (ИС) «Непотопляемость». Поступление воды в отсеки ДО и ее фильтрация в соседние отсеки при получении пробоины – типичные картины возникновения и развития нестационарных процессов в сложных динамических системах. Основная задача, решаемая в процессе функционирования ИС, состоит в выработке практических рекомендаций по прогнозу развития аварийных ситуаций в условиях неопределенности и

* Исследования проведены при поддержке Федерального агентства по образованию по проекту «Интеллектуальная система навигации и управления морским динамическим объектом в экстремальных условиях эксплуатации», в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

неполноты исходной информации. Для реализации этой задачи авторами предложен подход к синтезу нейросетевых моделей нестационарных систем, включающий процедуры структурного и параметрического синтеза ИНС, а также параметров распределений на основе специально разработанного алгоритма. При использовании синтезированных моделей для обработки последовательно поступающих данных измерений выполняется рекуррентная модификация параметров нейронной сети. Разработанные процедуры могут быть использованы при решении ряда задач идентификации системы (определения текущей ситуации) и краткосрочного прогнозирования.

Математическая модель, описывающая физические картины поведения аварийного динамического объекта

Математическая модель, описывающая взаимодействие аварийного ДО с внешней средой, представлена системой дифференциальных уравнений бортовой качки судна с затопленным отсеками [4], [14], [20]:

$$\left(m^* + \mu_{22}^*\right)\eta_G'' + \lambda_{22}^*\eta_G' + \lambda_{22}^{*(2)}\eta_G'\left|\eta_G'\right| + \rho\sum_{n=1}^{\infty} C_n g_n = P^*(t); \tag{1}$$

$$\begin{gathered}\left(J_x^* + \mu_{44}^*\right)\vartheta'' + \lambda_{44}^*\vartheta'^{(1)}\vartheta'\left|\vartheta'\right| + D^* l^*(\vartheta) + \mu_{24}^*\eta_G'' + \lambda_{24}^*\eta_G + \\ +\rho\sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n g_n + gC_n g_n\right) = M_x^{BB*} + P^*(t)\left(z_p^* - z_q^*\right) - J_x\Delta''^*(t);\end{gathered} \tag{2}$$

$$\begin{gathered}g_n'' + \sigma_n^2 g_n + \left(\sigma_n^2/g\right)\left\{\left[a_n + \left(z_G^* - z_v\right)C_n\right]\left(\vartheta'' + \Delta''\right) + \right. \\ \left. +gC_n\left(\vartheta + \Delta^*\right) + C_n\left(\eta_G'' + \eta''^*\right)\right\} = 0, \\ \left(n = 1, 3, 5, \ldots\right),\end{gathered} \tag{3}$$

где $\eta_G = \left(\eta_G^* - \eta^*\right)$ – относительное поперечно-горизонтальное перемещение судна; $\vartheta = \left(\theta - \Delta^*\right)$ – относительный угол крена; z_v^* – аппликата центра тяжести затопленного объема; знаком «*» отмечены величины, претерпевшие вариацию в результате затопления.

Интерпретация нештатных ситуаций дается на основе представлений в виде временных кривых и траекторий изображающей точки на фазовой плоскости. Анализ поведения аварийного ДО на волнении позволяет выделить три характерные ситуации, определяющие развитие и стабилизацию нестационарных процессов бортовой качки аварийного ДО:

– развитие и стабилизация крена (после проведения мероприятий по борьбе за живучесть) в процессе взаимодействия ДО с внешней средой на нерегулярном волнении ограниченной интенсивности;

– переход ДО из одного стабильного состояния в другое (смена аттрактора) после завершения процесса затопления отсеков и прекращения фильтрации воды в соседние отсеки;

– непрерывное нарастание динамического крена при обвальном затоплении отсеков аварийного судна, находящегося под воздействием нерегулярного волнения.

На рис. 1 – 4, 6, 7 представлены экстремальные ситуации, характеризующие указанные выше режимы колебаний. Первая из этих ситуаций (рис. 1) возникает при симметричном затоплении отсеков и фильтрации воды из смежных отсеков асимметричного затопления, вследствие чего ДО приобретает крен (в рассмотренном сценарии развития ситуации $\theta \approx 12°$) и находится под воздействием внешних возму-

щений (ветер, нерегулярное волнение). Кренящий момент от фильтрации воды в асимметричные отсеки изменяется монотонно до угла $\theta \approx 12°$, затем стабилизируется, а после проведения мероприятий по борьбе за живучесть монотонно убывает и система возвращается в исходное состояние:

$$M(t) = k_1\theta(\theta \le 12°, t \le t_1),\ M(t) = const(\theta = 12°, t \in [t_1, t_2]),\ M(t) = k_2\theta, t \in [t_2, t_0].$$

В результате проведения мероприятий по борьбе за живучесть (откачка поступившей воды, прекращение фильтрации воды из смежных отсеков, устранение крена до $\theta \approx 0°$) ДО возвращается в устойчивый (близкий к исходному) режим колебаний на нерегулярном волнении.

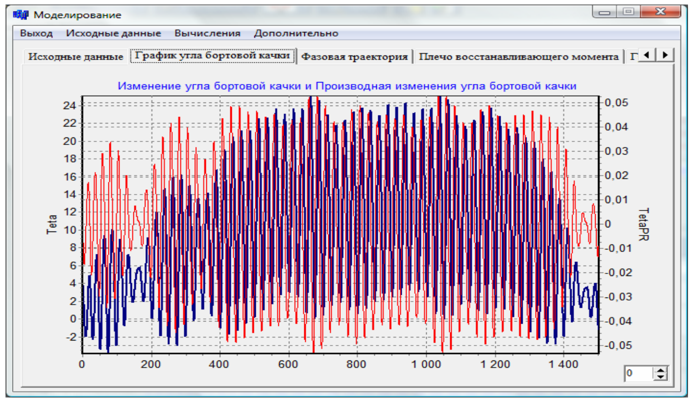


Рисунок 1 – Временные кривые, характеризующие развитие и стабилизацию крена при асимметричном затоплении отсеков ДО на нерегулярном волнении (светлая кривая описывает эволюцию угловой скорости при бортовой качке)

Фазовый портрет рассматриваемой динамической системы представлен на рис. 2, из которого следует, что формирование аттракторного множества в этом случае представляет собой типичный случай одностабильной динамической системы, подверженной нестационарным случайным возмущениям, выводящим ДО из стабильного состояния на определенном отрезке времени, и вновь возвращаемой в исходное состояние после снятия возмущения.

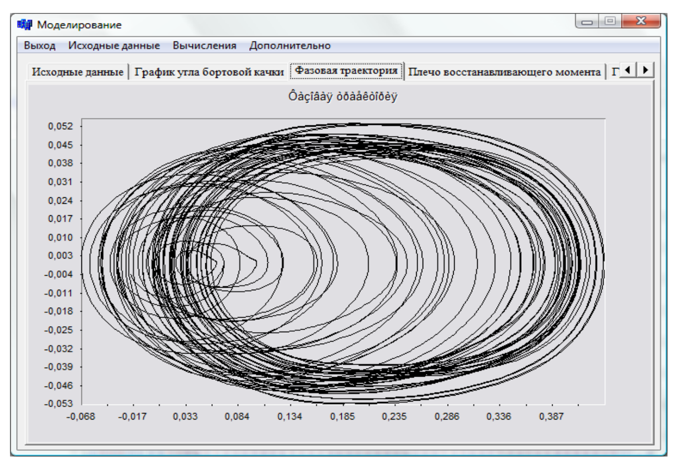


Рисунок 2 – Фазовый портрет, характеризующий поведение динамической системы в процессе развития и стабилизации крена

Вторая ситуация (рис. 3) связана с переходом динамической системы от одного стабильного состояния равновесия ($\theta = 0$) к другому $\theta = \theta_1$, более неблагоприятному стабильному состоянию (смена аттрактора). Физические особенности такого перехода объясняются возникновением крена ДО вследствие асимметричного затопления отсеков.

Как видно из рис. 4, при крене ДО $\theta = \theta_1$ система представляет собой последовательность нерегулярных колебаний около угла $\theta_1 \approx 17°$ под влиянием различных (внутренних и внешних) факторов и, в первую очередь, нестационарного ветра и нерегулярного волнения.

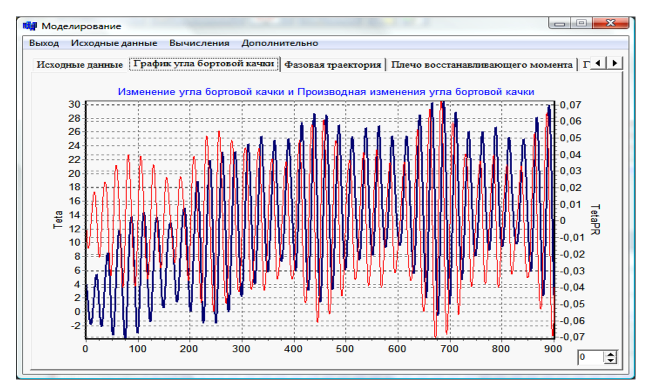


Рисунок 3 – Смена стабильных состояний (смена аттрактора) динамической системы

Фазовый портрет динамической системы, представленной на рис. 3, характерен для многих нелинейных систем, описываемых с помощью математической модели (1). Эволюция фазовых траекторий аварийного ДО при асимметричном затоплении отсеков приведена на рис. 4.

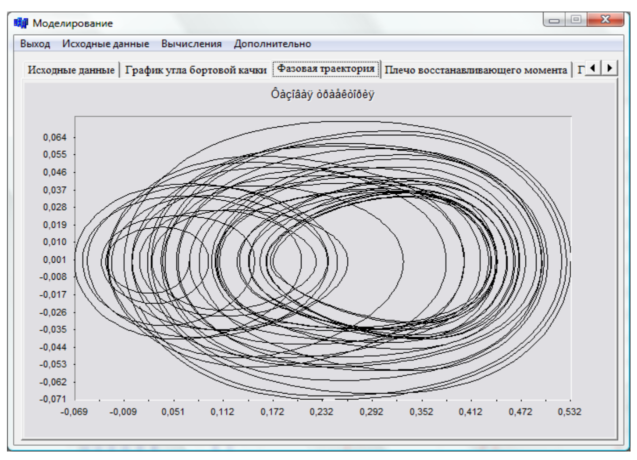


Рисунок 4 – Фазовый портрет динамической системы, характеризующей смену стабильных состояний ДО на нерегулярном волнении

Из этого рисунка следует, что формирование аттракторного множества в этом случае представляет собой типичный случай бистабильной динамической системы, характеризуемой нестационарным поведением. Случайные возмущения (нерегулярные колебания жидкости в затопленных отсеках, нестационарный ветер и нерегулярное волнение), выводят ДО из стабильного состояния при $\theta = 0$ в новое состояние при $\theta = \theta_1$.

Следует заметить, что представленный на рис. 4 аттрактор отличается от классического аттрактора бистабильной системы (рис. 5 В), формирование фазовых траекторий в которой вызвано особенностями динамической системы (третий классический случай затопления). Эти особенности можно объяснить тем, что исследуемый ДО является неустойчивым в прямом положении. Он может наклоняться на правый (RB) или левый (LB) борт, (причем $\theta_{RB} = \theta_{LB}$) даже при отсутствии внешнего возмущения (случай отрицательной метацентрической высоты, вызванной значительной свободной поверхностью жидкости в затопленных отсеках). Одним из факторов, воздействие которых может привести к возникновению ситуации, представленной на рис. 5 В),

является смещение груза в трюмах, другим – потеря начальной остойчивости при затоплении отсеков. Именно последняя ситуация является типичным примером динамики бистабильной системы в классическом ее понимании (рис. 5 В).

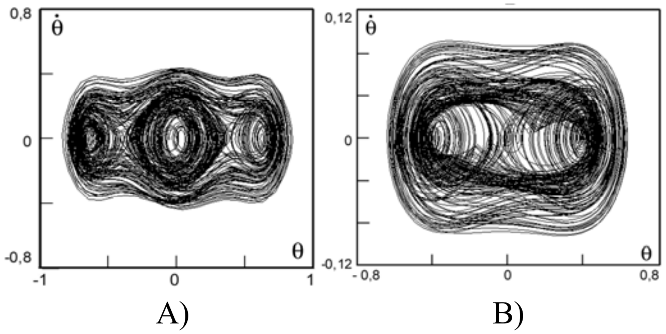


Рисунок 5 – Фазовый портрет трехстабильной (А) и бистабильной (В) динамической системы при анализе экстремальных ситуаций

В этом случае в динамической системе имеются два аттрактора, и нерегулярные колебания происходят около равновесных, симметрично расположенных углов крена на правый или левый борт. Еще более сложный случай – поведение трехстабильной системы (рис. 5 А), которая характеризуется наличием трех аттракторных множеств. Возникновение такой сложной колебательной системы возможно в случае, когда ДО имеет развитые надстройки, водонепроницаемость которых обеспечена в процессе эксплуатации [11]. Переход от ситуации (рис. 3) к ситуации (рис. 5 В) возможен при условии потери начальной остойчивости в условиях симметричного затопления больших отсеков, расположенных от борта до борта (достаточно типичный случай для судов небольшого водоизмещения).

Третья ситуация (рис. 6) характеризуется непрерывным нарастанием крена в результате поступления больших масс воды внутрь корпуса ДО. Поведение такой динамической системы представляет типичный случай нестационарных колебаний и связано с непрерывным изменением динамики объекта и внешней среды.

Это – наиболее тяжелый случай реализации динамики аварийного объекта на волнении. Из-за поступления больших масс воды в условиях асимметричного затопления ДО теряет остойчивость и опрокидывается под воздействием внешних возмущений.

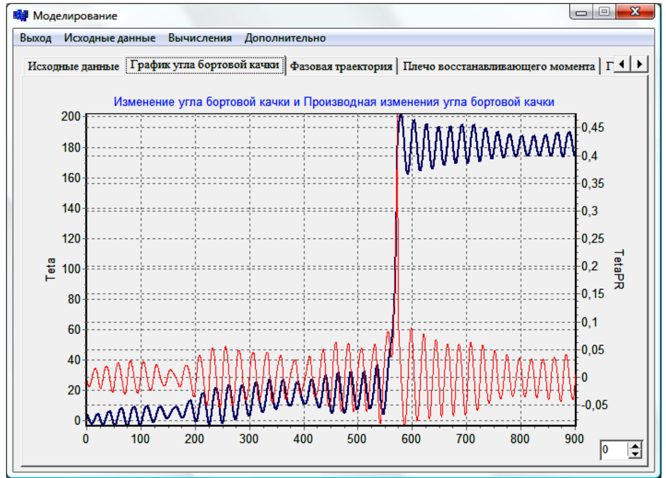


Рисунок 6 – Непрерывное нарастание крена при обвальном затоплении отсеков аварийного ДО на волнении

Фазовый портрет нестационарной динамической системы, представленной на рис. 6, изображен на рис. 7 и характеризует непрерывное нарастание крена, сопровождающееся нерегулярными колебаниями ДО. В процессе эволюции рассматриваемая система либо окажется устойчивой (перейдет в новый аттрактор) при постепенном уменьшении интенсивности затопления и внешних возмущений (как это видно из рис. 3 и 4), либо произойдет потеря устойчивости колебательного движения (опрокидывание, рис. 6 и 7, когда колебательный режим реализуется около угла θ = 180°).

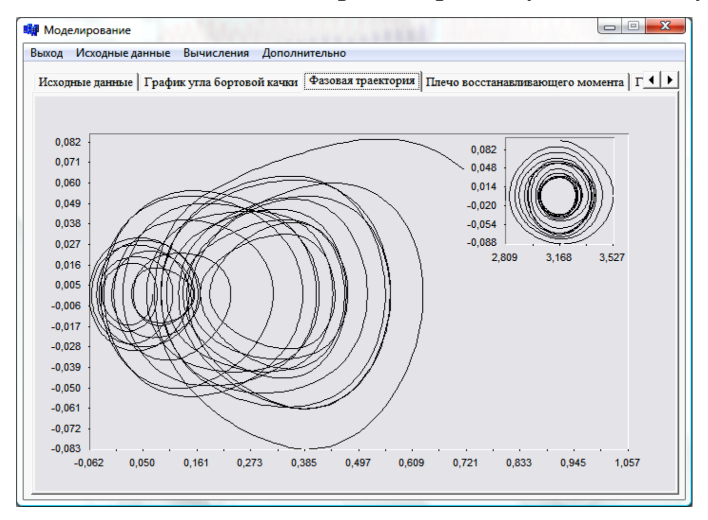


Рисунок 7 – Фазовый портрет нелинейной нестационарной динамической системы, характеризующий потерю устойчивости нерегулярных колебаний в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды

Геометрическая интерпретация

Рассмотрим принципиально иной подход к моделированию нелинейной нестационарной динамической системы для рассмотренных экстремальных ситуаций. Используем методы теории катастроф [23] и представим поведение системы с помощью катастрофы сборки, позволяющей получить наиболее полное представление о топологии геометрического пространства в процессе развития эволюции системы.

Обсудим сначала первые две стратегии поведения нелинейной нестационарной системы с позиций теории катастроф. На рис. 8 – 9 представлены топологические картины взаимодействия аварийного судна с внешней средой.

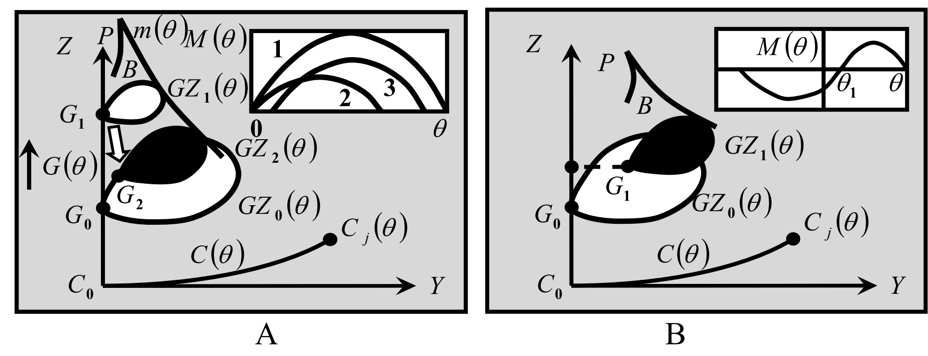


Рисунок 8 – Топологические картины поведения нелинейной нестационарной системы в экстремальной ситуации: А) – первый тип затопления; В) – второй тип затопления

Здесь изображены картины модифицированной катастрофы сборки применительно к исследуемой физической системе, показаны характерные точки, кривые и области изменения исследуемых характеристик в плоскости YZ для экстремальной ситуации, характеризующей динамику аварийного судна на волнении: m_0 – исходное положение метацентра; $m(\theta)$ – метацентрическая эволюта (многообразие катастроф); G_0 – исходное положение ЦТ. Заштрихованные области $GZ(\theta)$ характеризуют конечные множества, отображающие динамическую среду в конечных стадиях развития аварийной ситуации.

Для аналитической интерпретации ситуации в правом верхнем углу представлена диаграмма изменения восстанавливающего момента $M(\theta)$. Цифрами 1, 2, 3 на рис. 8 А) отмечены кривые $M(\theta)$ для положений ЦТ в точках G_0, G_1 и G_2 соответственно. Точка C_0 является центром величины (ЦВ) судна при угле крена $\theta = 0$. Кривая $C(\theta)$ представляет собой множество, отображающее структурные изменения в форме подводной части корпуса. С помощью этой кривой описывается пространственное перемещение ЦВ в зависимости от θ. Радиус кривизны кривой $C(\theta)$ определяет величину метацентрического радиуса $r(\theta)$, величина которого при $\theta = 0$ характеризует начальное положение метацентра m_0. Кривая метацентров образует метацентрическую эволюту – бифуркационное множество $B(\theta)$ модифицированной модели сборки. В силу симметрии кривая $C(\theta)$ всегда будет иметь при $\theta = 0$ либо локальный минимум, либо локальный максимум, а кривая метацентров – особенность, в данном случае особенность стандартной или двойственной сборки.

Интерпретация ситуации на рис. 8 А) дает следующие результаты. В момент появления пробоины система скачком перемещается в новое состояние. Возникновение скачка (катастрофы) обусловлено резким ухудшением начальной метацентрической высоты вследствие принятия жидкого груза и образования большой площади свободной поверхности жидкости симметрично затопленного отсека. ЦТ системы практически мгновенно перемещается из точки G_0 в точку G_1. При этом значительно уменьшается область $GZ(\theta)$ и восстанавливающий момент $M(\theta)$ и судно оказывается в критическом состоянии, поскольку интенсивные внешние возмущения могут привести к опрокидыванию судна. После проведения мероприятий по стабилизации ситуации система возвращается в область с ЦТ в точке G_2. При этом остается незначительный неуравновешенный крен θ_1. Нестационарность исследуемых динамических процессов в рассматриваемой ситуации проявляется в непрерывном изменении математического ожидания и дисперсии в процессе эволюции системы.

Топологическая картина на рис. 8 может быть дополнена другими точками, позволяющими рассматривать различные состояния судна и определяющими эквивалентные положения ЦТ для опрокидывающего момента, углов крена, соответствующих начальному (во время приложения кренящего момента) и конечному (динамическому) наклонению судна, а также эквивалентных положений ЦТ твердого и жидкого груза во время погрузки (разгрузки) судна.

Случай на рис. 8 В) характеризует асимметричное затопление. Здесь происходит пространственное перемещение ЦТ из точки G_0 в точку G_1. Скачок возникает при достаточно интенсивном затоплении. Если удается стабилизировать ситуацию, то ЦТ сохраняется в точке G_1, а бифуркационное множество В определяется положением эволюты с точкой сборки Р. Аналитическая интерпретация ситуации может быть проведена с использованием диаграммы остойчивости в правом верхнем углу экрана для положения ЦТ в точке G_2. Из этих данных следует, что в рассматриваемом случае затопления судно плавает с креном θ_1 в условиях пониженной остойчивости. Это требует проведения неотложных мероприятий по поддержанию живучести судна.

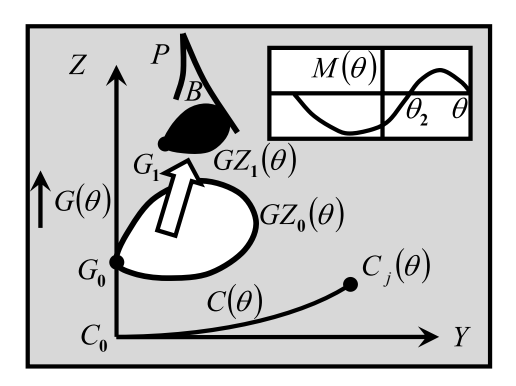


Рисунок 9 – Топологическая картина развития экстремальной ситуации, описывающей поведение нелинейной нестационарной системы в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды

Ситуация на рис. 9 еще более тяжелая. Из-за непрерывного поступления внутрь корпуса больших масс воды происходит непрерывное изменение динамики объекта. Причем, точка G_1 здесь соответствует более высокому положению ЦТ по сравнению с ситуацией на рис. 8, а диаграмма остойчивости характеризуется кривой $M(\theta)$, свидетельствующей о чрезвычайно низкой сопротивляемости к восприятию кренящих нагрузок. В результате судно оказывается в критическом состоянии, поскольку достаточно незначительного кренящего момента, чтобы вызвать опрокидывание. В случае фильтрации воды в соседние отсеки положение аварийного судна еще более ухудшится и потребует срочного принятия решений по стабилизации ситуации.

Если продолжается обвальное затопление (рис. 9), то система непрерывно изменяет свое состояние в процессе эволюции и совершает движение в направлении возникновения новой катастрофы – опрокидыванию под воздействием внешних возмущений в условиях резкого снижения практически всех элементов, определяющих катастрофу сборки.

Заключение

Анализ использования нейросетевых технологий при исследовании поведения аварийного ДО как нестационарной динамической системы в условиях нерегулярного волнения показал, что процесс взаимодействия объекта с динамической внешней средой характеризуется рядом особенностей, присущих сложным нелинейным системам, функционирующим в условиях неопределенности и неполноты исходной информации. Трудности, связанные с анализом таких систем, в значительной степени могут быть преодолены за счет применения нейросетевых технологий. Рациональное использование ИНС при исследовании нестационарных динамических систем позволяет обеспечить гибкость и способность адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. При этом сохраняется устойчиво высокое качество работы ИНС и реализуется недосягаемый ранее уровень вычислительной мощности.

Проведенные вычислительные эксперименты свидетельствуют о работоспособности и эффективности реализации нейросетевых моделей в сложных задачах анализа и интерпретации экстремальных ситуаций в условиях непрерывного изменения динамики объекта и внешней среды. Параллелизм и возможность нелинейного преобразования информации в реализуемых конфигурациях нейросетевых структур открывают перспективы практической реализации ИНС в задачах анализа и интерпретации данных динамических измерений в бортовых ИС новых поколений.

Литература

1. Андронов А.А. Теория колебаний / Андронов А.А., Витт С., Хайкин С.Э. – М. : Наука, 1981.
2. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1974.
3. Блакьер О. Анализ нелинейных колебаний / Блакьер О. – М. : Мир, 1969.
4. Бортовые интеллектуальные системы. – Часть 2. Корабельные системы. – М. : Радиотехника, 2006.
5. Востриков А.С. Проблема синтеза алгоритмов автоматического управления нелинейными нестационарными объектами / А.С. Востриков // Доклады 2-й Российской мультиконференции по проблемам управления и 5-й научной конференции «Управление и информационные технологии УИТ – 2008». – Санкт-Петербург, 2008. – Т. 1. – С. 56-61.
6. Галушкин А.И. Теория нейронных сетей / Галушкин А.И. – М. : ИПРЖР, 2000.
7. Герасимов Б.М. Система поддержки принятия решений в АСУ реального времени / Б.М. Герасимов., В.И. Глуцкий, А.А. Рабчун // Искусственный интеллект. – 2000. – № 3. – С. 39-47.
8. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / [под ред. Ю.И. Нечаева]. – Санкт-Петербург, 2001.
9. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего / Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. – М. : Наука. 1997.
10. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах / Майника Э. – М. : Мир, 1981.
11. Малинецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов. – М. : УРСС, 2002.
12. Милов В.Р. Структурно-параметрический синтез нейросетевых моделей нестационарных систем / Милов В.Р., Шалюгин С.А. // Сборник научных статей 9-й Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2007». Ч. 1. – Москва : МИФИ. – 2007. – С. 205-213.
13. Неймарк Ю.И. Стохастические и хаотические колебания / Ю.И. Неймарк, П.С. Ланда. – М. : Наука, 1987.
14. Нечаев Ю.И. Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции / Нечаев Ю.И. – Л. : Судостроение, 1989.
15. Нечаев Ю.И. Математическое моделирование в бортовых интеллектуальных системах реального времени / Ю.И. Нечаев // Труды 5-й Всероссийской конференции «Нейроинформатика-2003». – М. : МИФИ. – 2003. – Лекции по нейроинформатике. Ч. 2. – С. 119-179.
16. Нечаев Ю.И. Нейросетевые ансамбли при интерпретации экстремальных ситуаций в бортовых интеллектуальных системах / Ю.И. Нечаев // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2006. – № 6. – С. 60-69.
17. Нечаев Ю.И. Принципы построения бортовой интеллектуальной системы контроля поведения судна на волнении как нестационарного динамического объекта / Ю.И. Нечаев, О.Н. Петров // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 423-432.
18. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация: алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, Л. Стайглиц. – М. : Мир, 1985. – 512 с.
19. Сейдж Э.П. Идентификация систем управления / Э.П. Сейдж, Дж.Л. Мелс. – М. : Наука, 1974.
20. Справочник по теории корабля : в 3 т. – Л. : Судостроение, 1985.
21. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссермен. – М. : Мир, 1992.
22. Хаяси Т. Нелинейные колебания в физических системах / Хаяси Т. – М. : Мир, 1968.
23. Poston T. Catastrophe theory and its application / T. Poston, I. Steward. – London : Pitman, 1978.
24. Saaty T.L. A sealing method for priorities in hierarchical structures / T.L. Saaty // J. Match. Psychology. – 1977. – Vol. 15, № 3.
25. Takens F. Lectures notes in mathematics / Takens F. – N.Y. : Springer, 1981. – P. 366-381.
26. Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing / L. Zadeh // Commutation on the ASM-1994. – Vol. 37, № 3. – P. 77-84.

Ю.І. Нечаєв, О.М. Петров

Дослідження поведінки нестаціонарного динамічного об’єкта в бортових ІС нових поколінь

Розглянуто підхід, побудований на реалізації принципу конкуренції у рамках концепції м’яких обчислень. Методологічною основою для побудови алгоритмічних процедур прийняття рішень у нечітких умовах є концепція оптимальності рішення та наявних ресурсів (нечітка мета та обмеження).

Статья поступила в редакцию 01.06.2010.